中国生态农业学报 2016 年 10 月 第 24 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2016, 24(10): 1285−1299

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160424

南方稻区杂交中籼稻高产品种的库源结构及其优化调控规律研究进展*

徐富贤[1,2] 熊 洪[1,2] 张 林[1,2] 朱永川[1,2] 刘 茂[1,2] 蒋 鹏[1,2] 郭晓艺[1] 周兴兵[1]

(1. 四川省农业科学院水稻高粱研究所/农业部西南水稻生物学与遗传育种重点实验室 德阳 618000;
2. 国家水稻改良中心四川泸州分中心 泸州 646100)

摘 要 探明水稻高产品种的库源结构，对指导育种实践具有普遍意义。在大面积水稻生产中，利用品种自身的库源特征及种植地的生态和土壤肥力关键指标及其与高产栽培技术的相关性，确定品种高产优质高效栽培模式，不仅可节省因种栽培所需的人力、财力，还可加快新品种示范、推广进程。本文根据已报道资料，结合笔者 20 余年的研究结果，综合分析了杂交水稻高产品种的库源特征及其因种优化调控规律的研究进展。主要内容包括：(1)水稻高产品种的穗粒数以 160~220 粒为佳，这类品种在协调了“库”与“源”矛盾的同时，还较好地利用了基部绿叶的光合生产能力；大穗型品则应通过适当增施粒肥，充分发挥下部叶片的光合功能以提高结实率和千粒重。(2)采用扩“库”增“源”的高产栽培策略，增施氮肥以补充光合源，从而保证在高粒叶比情况下有较好的籽粒充实度。旱育秧比当地湿润育秧的增产量与海拔高度呈极显著正相关，与当地湿润育秧的产量水平呈极显著负相关；水稻高产高效氮肥施用量与地理位置和土壤肥力呈极显著线性关系。氮后移的增产效果与稻田地力呈显著负相关关系，并通过提高穗粒数和千粒重而增产。建立了以齐穗期剑叶 SPAD 值(X)预测粒肥高效施用量(Y)的简便适用新方法，Y=−30.798X+1 340.9, r=0.954 7**。形成了水稻高产与蓄水相结合的水分管理技术。(3)水稻高产栽插密度分别与施氮量和不同品种之间的穗粒数呈极显著负相关关系；每穗粒数偏少的品种更适宜强化栽培，生产上以选择传统栽培条件下的穗粒数不超过 170 粒的中小穗型品种为宜。前氮后移增产量(Y)与杂交组合穗粒数(X)的关系可表述为：Y=2 607.9−11.02X (R^2=0.630 8)，穗粒数≤237 粒可作为采用前氮后移施肥法的杂交品种的选择指标。有待进一步补充和完善的研究内容主要有：适应机插、机收的杂交水稻品种“库”“源”结构，杂交水稻前期苗情诊断与高产高效施肥技术，杂交水稻倒伏的早期监测与预防技术，和杂交水稻减氮增产高效技术。

关键词 杂交水稻 高产品种 库源结构 优化调控 前氮后移 施氮量 穗粒数
中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)10-1285-15

Research progresses and prospects of sink-source structures and optimal regulation of high-yield varieties of hybrid rice in China*

XU Fuxian[1,2], XIONG Hong[1,2], ZHANG Lin[1,2], ZHU Yongchuan[1,2], LIU Mao[1,2], JIANG Peng[1,2], GUO Xiaoyi[1], ZHOU Xingbing[1]

(1. Rice and Sorghum Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Southwest Rice Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Deyang 618000, China; 2. Luzhou Branch of National Rice Improvement Center, Luzhou 646100, China)

---

* 国家水稻产业体系(CARS-01-29)、农业部公益性行业专项(200903002, 201003016)和科技部重大科技支撑专项粮食科技丰产工程(2011BAD16B05-1)资助
徐富贤，主要从事水稻栽培、生理、生态研究。E-mail: xu6501@163.com
收稿日期: 2016−05−09 接受日期: 2016−07−02

* This work was supported by the China Agriculture Research of National Rice Industry System (CARS-01-29), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (200903002, 201003016), and the National Grain Bumper Science and Technology Project (2011BAD16B05-1).
Corresponding author, XU Fuxian, E-mail: xu6501@163.com
Received May 9, 2016; accepted Jul. 2, 2016

Abstract Exploring sink-source structures of high-yield rice varieties is generally significant for breeding practices. High-yield cultivation mode of large-scale rice production was determined based on sink-source characteristics of high-yield rice varieties, key indicators of ecological conditions, soil fertility of planted areas and high-yield cultivation techniques. As a result, it was not only saved manual labor and financial resources needed for the study of cultivation techniques of new varieties, but also accelerated the processes of demonstration and promotion of new varieties. In view of the reported data and research results of decades (over 20 years) of studies, sink-source structures of hybrid rice for high-yield varieties and the research progress on optimal control were summarized in this paper. The main results included: (1) High-yield rice varieties with 160–220 grains per panicle not only had coordinated contradictions between sinks and sources, but also improved photosynthetic efficiency. For big-panicle rice varieties, special attention was needed for the proper fertilizer application to increase grain filling and full use of the photosynthetic function of lower leaves in order to improve seed setting rate and 1000-grain weight. (2) A high-yield cultivation strategy of hybrid mid-rice with sparse cultivation was adopted with increased nitrogen application and photosynthetic source replenished so as to maintain normal grain filling under high grain-leaf ratio conditions. Increase in grain yield of upland rice seedlings over wet rice seedlings was significantly positively correlated with altitude, while it was significantly negatively correlated with yield of wet rice seedlings. Optimized application of nitrogen in hybrid rice was significantly influenced by ecological site conditions and soil nutrient states. Yield-increasing effects of the postponed nitrogen application and optimized application of nitrogen were strongly negatively correlated with soil fertility. Increase in grain yield was due to increased effective panicle number and 1000-grain weight. Highly significant negative correlations were noted between efficient nitrogen application (Y, kg·hm^{-2}) for grain filling and SPAD value (X) of the first leaf from top at full panicle stage, $Y = -30.798X + 1\ 340.9$ and $R^2 = 0.911\ 4$. A management technique of high-yield, water-saving rice was developed. (3) Transplanting density had significant negative correlation separately with grains number per panicle and applied N amount for varieties. There was significant effect of intensive cultivation system on yield increase, compared with traditional cultivation. A negative correlation was also noted between increased yield and grains number per panicle among varieties. Hybrid rice with less than 170 grains per panicle in traditional cultivation was suitable for intensive cultivation. Grain yield differences were caused by 2 different fertilization modes: nitrogen fertilizer shifted from basal tillering to panicle initiation (PBSP) stage and heavy basal N plus top-dressing at early tillering stage. Negative correlation was also observed between grain yield increase due to postponed nitrogen application difference (Y) and grains number per panicle (X), i.e., $Y = 2\ 607.9 - 11.02X$ ($R^2 = 0.630\ 8$). Hybrid rice cultivars with grains number per panicle less than 237 were suitable for PBSP fertilization. This research focused mainly on the theory and technique of optimal control of hybrid rice and then pointed out future research directions. The future researches should focuse on sink-source structures of hybrid rice varieties adaptable to mechanical transplanting and harvesting, early diagnosis and optimal fertilization techniques needed for high yields. Also early detection and prevention mechanisms of lodging and cultivation technique of hybrid rice were needed for reduced nitrogen use, increased yield and high-production efficiency.

Keywords Hybrid rice; High yield variety; Sink-source structure; Optimized control; Postponed nitrogen application; Nitrogen application rate; Grain number per panicle

我国南方稻区现有杂交水稻面积在 1 500 万 hm^{2}左右，2012 年我国的杂交稻在东南亚及美国等国外种植面积已超过 520 万 hm^2。杂交水稻总面积约占全世界水稻面积的 13.3%，平均每公顷产量比当地常规品种高出 2 t 左右[1]。因此，发展杂交水稻对我国乃至世界粮食增产具有重大意义。水稻产量除受品种遗传基因的控制外，很大程度上受环境条件、土壤肥力和栽培措施的影响[2]。为了提高水稻高产育种与栽培效率，本文根据已报道资料，结合笔者 20 余年的研究结果，分析总结了杂交水稻高产品种的库源特征及其因种优化调控规律的研究进展，以供广大杂交水稻育种、栽培与推广科技人员参考。

1 水稻库源结构及其调控在指导品种选育和高产栽培中的理论价值

水稻产量和米质是良种、环境和良法互作的综合体现，其中水稻基因型是高产优质的主导因子。在杂交水稻遗传育种工作中，育种家们通过不同遗传背景的基因型材料杂交，再从优良亲本间的杂交后代中选择高产优质品种。不同的基因型表现不同的表型性状，育种工作者根据表型性状(库源特征)进行初步选择。由于不同生态条件影响和不同育种者对理想株型的认识差异，在水稻育种上存在不同观点。如黄耀祥等在 20 世纪 60 年代开始注重矮化育种[3]，杨守仁等[4]20 世纪 80 年代提出了水稻超高

产的理想株型理论，周开达等[5]20 世纪末期主张重穗型杂交育种，程式华等[6]在 21 世纪初提出了后期功能型育种，其他众多育种家还有各自的选择经验。虽然提出的选择方向有明显差异，但均涉及品种的库源结构。因此，探明水稻品种间产量与库源结构的关系，对指导育种实践具有普遍意义。

关于水稻因种高产优质栽培，先期主要针对某一品种开展相应的栽培技术研究。如孙永健等[7]研究了水肥运筹对杂交稻'冈优 725'产量及品质的影响；杨志远等[8]、徐富贤等[9]分别研究了栽培方式和氮肥管理与杂交中稻'Ⅱ优 498'和'川优 9838'的产量和氮肥利用率的关系；作者[9–10]近期探索了优质杂交中稻'渝香优 203'产量的地域差异及其磷钾高效施用量，从而获得各品种的高产高效和优质的栽培技术。我国水稻种植面积大，每年通过全国或各省(市)审定的杂交水稻品种上百个，对一个品种而言其高产栽培技术的研究至少需要 2~3 年的时间，若每个品种均开展因种栽培研究工作，无论是时间还是财力、人力都难以满足需要，只能针对一些重要品种或对栽培技术有特殊要求的品种进行研究。故此，通过研究品种库源特征、不同生态条件和土壤地力与其高产栽培技术的相关性，大面积水稻生产上则可根据品种自身的库源特征及种植地的生态和土壤肥力关键指标，大致确定其高产优质高效栽培模式。既大大节省了因种栽培所需的人力、财力，还加快了新品种的示范、推广进程。因此开展因种高产调控规律研究，具有费省效宏的重要作用。

2　杂交水稻高产品种的库源结构

2.1　品种间产量与库源结构的关系

水稻产量受籽粒充实度影响极大，而籽粒充实度又受到源库结构制约。曹显祖等[11]将长江中、下游中熟籼、粳品种分为增源增产、增库增产以及库源互作3种类型，其中重穗型品种多属增源增产型，而穗数型品种多属增库增产型[11–12]。朱庆森等[13]对大量典型的籼粳亚种间杂交种组合的产量源库特征研究指出，亚种间杂交组合的库容优势很明显，但大多数组合的光合产物向穗部运转不畅而限制了其高产潜力；采用籼粳杂交稻育种方法可获得"库"大"流"畅的重穗型组合，群体穗粒数可达300粒以上[14–15]，也因"源"不足而影响产量[11–13]。在重穗型杂交水稻育种实践中，明确源库特征临界值可作为育种工作者的选择指标。为此，徐富贤等[16]以多个杂交中稻组合为材料，在两种密、肥处理下，研究了品种间源库结构对籽粒充实度的影响。结果表明，在保证每公顷理论产量和产量潜力分别达9 t和11 t，结实率不低于80%的高产前提下，最适宜的穗粒数为160~220粒，相应每公顷有效穗、千粒重、叶粒比、结实率、籽粒充实率、籽粒充实指数和单穗重取值范围如表1所示。可作为选择高产杂交水稻组合的参考依据。根据表1显示的库源特征分析，在长江上游杂交中稻大面积高产栽培条件下，群体穗粒数小于160粒、160~220粒和大于220粒的组合，分别属增库增产型、库源互作型和增源增产型。其中增库增产型组合表现为"库"小"源"足、籽粒充实度较好、"源"利用不够充分；增源增产型组合则相反，表现为"库"大"源"小、籽粒充实度差，产量潜力未有充分发挥；而库源互作型组合较为理想。因此，生产上应根据不同类型组合采取相应的栽培措施。徐富贤等[17]进一步分别在夏旱田、普通田和囤水田3类冬水田下的研究认为，杂交中稻产量在不同稻田类型间产量差异显著，30个杂交组合在不同稻田类型的产量变异趋势一致，品种与稻田类型的互作效应不显著；冬水田杂交中稻高产栽培的主攻目标是通过增加有效穗而提高颖花量，提出了在3类稻田均可获得高产的杂交中稻组合的穗粒数、最高苗、有效穗、结实率、千粒重、颖花量、叶面积指数、粒叶比、单穗重的具体库源特征，与前文[16]结果相符(表1)。矮秆品种具有茎粗壮、节密、重心低，耐肥抗倒、分蘖力强、出蘖早而快，成穗率高，有效穗较多等生理优势[3]。袁隆平[15]指出水稻超高产育种并没有一个统一的标准和严格的定义，各家各派提出的产量指标并不相同；并根据某一超高产的品种表型值提出了杂交水稻超高产品种的株型特征。徐富贤等[18]还以15个杂交中稻品种为材料，在高产栽培条件下研究了灌浆期的库源特征与产量的关系。结果表明，提高齐穗期和成熟期的LAI、地上部干物重是水稻品种获得高产的基础，库大源足是高产品种的重要特征。高产品种每公顷产量9 000 kg以上的库源特征为：齐穗期的LAI为6.5~7.0，成熟期的LAI为3.5~4.0，成熟期的生物产量为每公顷18 750 kg左右，每公顷颖花数37 500万朵以上，齐稻期叶粒比1.7 $cm^2 \cdot 粒^{-1}$左右。

根据以上研究结果，笔者认为，水稻品种穗粒数可综合反映库源结构状况，高产品种的穗粒数以160~220粒为佳，其中长江上游地区宜偏上限，长江中、下游地区偏下限较好。

2.2　品种间籽粒充实度与库源结构的关系

2.2.1　灌浆期下部叶片对籽粒灌浆结实的作用与库源结构的关系

水稻抽穗后总颖花量已形成，产量高低受籽粒

表 1 杂交稻不同籽粒充实度组合的穗部性状与源库特征预测

Table 1 Prediction of panicle characters and source-sink characteristics for different grain plumpness index of hybrid rice

X_4 (grain·panicle^{-1})	X_5 (g)	X_2 (mg·grain^{-1})	X_3 (mg·mg^{-1})	X_6 (%)	X_7 (%)	Y (%)	X_8 (g)	X_1 (10^4·hm^{-2})	X_9 (t·hm^{-2})	X_{10} (t·hm^{-2})
100	31.68	8.80	0.280 2	97.76	98.57	96.05	3.09	243.49	7.524	7.714
110	31.38	8.59	0.275 2	96.35	98.40	94.56	3.33	238.06	7.917	8.217
120	31.08	8.37	0.270 2	94.94	98.24	93.07	3.54	232.63	8.235	8.676
130	30.77	8.16	0.265 2	93.53	98.07	91.58	3.74	227.21	8.498	9.089
140	30.47	7.94	0.260 2	92.12	97.90	90.09	3.93	221.78	8.715	9.461
150	30.17	7.73	0.255 2	90.71	97.73	88.60	4.11	216.35	8.892	9.791
160	29.86	7.52	0.250 2	89.30	97.56	87.11	4.27	210.92	9.006	10.077
170	29.56	7.30	0.245 2	87.89	97.40	85.62	4.42	205.49	9.076	10.326
180	29.28	7.09	0.240 2	86.47	97.23	84.13	4.56	200.06	9.117	10.544
190	28.96	6.87	0.235 2	85.06	97.07	82.64	4.68	194.64	9.109	10.710
200	28.65	6.66	0.230 2	83.65	96.89	81.15	4.79	189.21	9.069	10.842
210	28.35	6.44	0.225 2	82.24	96.72	79.66	4.90	183.78	9.005	10.941
220	28.05	6.23	0.220 2	80.83	96.56	78.17	4.99	178.35	8.900	11.006
230	27.74	6.01	0.215 2	79.42	96.39	76.68	5.07	172.93	8.763	11.033
240	27.44	5.80	0.210 2	78.01	96.22	75.19	5.14	167.50	8.605	11.031
250	27.14	5.58	0.205 2	76.60	96.05	73.70	5.20	162.07	8.423	10.996
260	26.83	5.37	0.200 2	75.19	95.88	72.21	5.25	156.64	8.216	10.927
270	26.53	5.15	0.195 2	73.78	95.72	70.72	5.28	151.21	7.991	10.831
280	26.23	4.94	0.190 2	72.37	95.55	69.23	5.32	145.79	7.749	10.707
290	25.93	4.73	0.185 2	70.96	95.38	67.74	5.34	140.36	7.490	10.555
300	25.62	4.51	0.180 2	69.54	95.21	66.25	5.34	134.93	7.212	10.371
310	25.32	4.30	0.175 2	68.14	95.04	64.76	5.35	129.50	6.926	10.165

X_1: 有效穗数; X_2: 叶粒比; X_3: 叶库比; X_4: 穗粒数; X_5: 千粒重; X_6: 结实率; X_7: 籽粒充实率; X_8: 单穗重; X_9: 理论产量; X_{10}: 产量潜力; Y: 籽粒充实指数。X_1: effective panicles number; X_2: leaf grain ratio; X_3: leaf sink ratio; X_4: spikelet per panicle; X_5: 1000-grain weight; X_6: seed set percentage; X_7: grain filling rate; X_8: panicle weight; X_9: theory grain yield; X_{10}: yield potential; Y: grain plumpness index.

灌浆结实状况制约较大。如万安良等[19]通过剪叶处理对籽粒产量影响的研究认为，水稻抽穗期保留上部 3 叶处理与全留叶处理间产量差异不显著，说明倒 4 叶以下叶片对灌浆结实几乎没有作用。这可能与其试验材料为小穗型、高叶粒比的常规稻品种有关。笔者以中等穗型的杂交组合‘汕优 63’为材料的研究结果表明，齐穗期在倒 1 叶、倒 2 叶与倒 3 叶的光合能力正常情况下，倒 4 叶以下叶片对产量的贡献较小[20]，这与万安良等[19]的结论基本一致。而杨建昌等[21]研究认为，冠层倒 4 叶至倒 1 叶叶长与每穗总粒数呈极显著正相关，冠层各叶叶长与结实率、千粒重及单株产量的关系因品种类型不同而有较大差异。其中，重穗型杂交稻组合‘汕优 3 号’等的倒 4 叶、倒 5 叶长度与产量呈显著正相关，而库限制型品种‘盐粳 2 号’等的倒 4 叶、倒 5 叶长度对产量影响较小。凌启鸿等[22]研究则认为，水稻生长前期下部叶片通过对影响后期长出的叶片营养质量而间接对产量有显著增产作用。作者等[23]再次研究指出，杂交中稻齐穗期倒 4 以下叶片对产量的作用与品种间穗粒数有关，群体穗粒数高于 185 粒的品种，倒 4 以下叶片对产量有显著增加作用，而群体穗粒数低于 185 粒的品种则没有作用。而当穗粒数超过 220 粒时，即使充分利用了倒 4 以下叶片对产量贡献，终因“源”严重不足致植株早衰、籽粒充实度差[16]。选择群体穗粒数 185~220 粒的杂交组合，即可充分利用倒 4 以下叶片的光合功能，又能保持较高水平的籽粒充实度而高产[24]。分析以上研究结果，作者认为灌浆期下部叶片对籽粒灌浆结实的作用与品种类型有关，源限制型品种应尽可能延长倒 4 以下叶片的功能期，促进籽粒灌浆结实；库限制品种则只要正常利用上部 3 片叶的光合功能即可。

2.2.2 粒重稳定性与库源结构的关系

在产量构成因素中千粒重是相对稳定的一个性状，但在不同生态环境与栽培水平条件下仍有较大变幅。王余龙等[25−26]分析了成熟期‘武育粳 2 号’不同比重籽粒的有关性状，结果表明，不同比重谷粒及其糙米的长、宽度差异较小，厚度、体积差异较大，千粒重极差达 6.43 g。不同施肥处理间全穗饱粒

千粒重的极差'汕优 63'为 3.91 g, 'Koganemasari'为 5.43 g, '9004'为 7.62 g; 稻穗不同部位饱粒千粒重的提高幅度为下部枝梗籽粒大于中部枝梗籽粒, 中部枝梗籽粒大于上部枝梗籽粒, 一、二次枝梗趋势一致[26]。并从施氮时期与浓度、根系活力、灌浆物质供应水平、灌浆过程、籽粒着生部位与籽粒性状等多角度研究了同一品种粒重差异的机理[25−27]。作者[28]通过剪叶、疏花、密肥等处理的研究结果显示, 杂交组合间千粒重变异值的极差最高可达 4.39 g, 穗粒数越多品种的千粒重的变异度越大。群体穗粒数≤146 粒的杂交组合, "源"供应量较充足, 其千粒重在不同栽培处理间的变异值的极差低于 1 g, 可作为不需要通过栽培措施提高籽粒充实度的临界参考指标。作者进一步研究了库源调节对杂交中稻强弱势粒的影响指出, 过多施用氮肥不利于籽粒增重。强势力明显比弱势粒千粒重高, 但通过适当增加"源"的供应量, 提高叶粒比水平, 弱势粒可以达到或超过正常生长植株强势粒的充实率水平[29]。

综上研究结果, 灌浆期品种间库源结构对籽粒灌浆结实的影响较大, 大穗型品种应注意通过适当增施粒肥, 充分发挥下部叶片的光合功能以提高结实率和千粒重。

2.3　根系活力与品种间库源结构的关系

根系功能, 尤其是中、后期根系功能对产量有明显影响。Kawata 等[30]指出, 最上 3 个发根节上的上层根数量越多产量越高。有研究结果[31−32]表明, 自上而下第 4 发根节位以下生长的下层根的数量和吸收能力与颖花数、穗重及产量呈显著正相关。可见水稻发根力和根系活力对高产育种的重要性, 但又难以在田间直接应用。为此, 笔者以 15 个杂交中稻品种为材料, 研究了发根力及根系活力与地上部性状的关系。结果表明, 杂交中稻品种发根力强可通过提高有效穗而增产, 根系活力强的品种有利于提高结实率, 并与产量呈极显著正相关[33]。在水稻育种田间选择工作中, 可将分蘖力强、结实率高作为选育发根力和根系活力强品种的参照指标。进一步以 21 个籼型杂交中稻组合为材料, 用标准化的基因型值进行了根系及地上部植株的 21 个性状对结实率的通径分析[34]发现, 4 叶期单株分蘖数, 分蘖盛期单株分蘖数、单株干重、发根力, 齐穗期 LAI、最高苗数和穗粒数 7 个性状对结实率的偏相关系数达到显著或极显著水平, 高结实率品种要求分蘖力和发根力强, 齐穗期 LAI 高, 穗子偏小。

综合以上结果可以看出, 分蘖力强、结实率高的中小穗型品种的根系活力和发根力强, 有利于高产。

3　杂交水稻高产栽培技术的规律性

3.1　高产栽培策略

水稻高产栽培策略要因地制宜, 不同生态稻区有明显差异。邹应斌[35]认为, 水稻超高产的栽培策略是在选用分蘖能力中等、偏矮秆、大穗型品种的基础上, 采用"稳前攻中促后"水肥运筹原则为主的壮秆重穗栽培法。郑家国等[36]指出, 在成都平原稻–麦(油)两季田地区, 保证杂交中稻有一定的有效穗数是高产的基础, 提高穗粒数是进一步高产的关键。作者的研究结果表明, 西南地区水稻的高产栽培策略是在选用抗倒伏能力强的品种和确定适宜的高产高效施肥量条件下, 注意增施有机肥和提高土壤有效氮含量; 高产栽培的主攻目标是增加有效穗和提高结实率[37]。

水稻高产需要满足 3 方面条件。一是通过提高最适叶面积指数增加光合"源"的数量和质量, 但主要受当地日照条件的限制[38]; 二是扩大"库容"量, 即协调穗数与穗大的矛盾; 三是畅"流", 即把生产的光合物质高效率地运转到籽粒中去。因此, 水稻高产栽培努力方向是在较高有效叶面积指数条件下, 保证适宜穗数范围内尽可能提高成穗率, 使穗粒数、结实率和千粒重在更高的水平上同步提高[39]。在具体栽培管理措施上, 可在苗期适时灌深水或搁田控制后期无效分蘖, 通过提高成穗率协调穗数与穗大的矛盾进而提高产量[40−42]。该方法在有水源保证的地区应用效果较好, 但在水利灌溉条件差的西南冬水田区却难以应用。为此, 作者[43]提出了冬水田区杂交中稻稀植足肥的高产栽培策略, 即通过稀植降低苗峰, 改善群体光照条件, 提高成穗率, 适当降低有效穗数, 大幅度提高穗粒数, 在保持高产适宜叶面积指数条件下扩大库容量; 增施氮肥补充光合源, 保证在高粒叶比情况下有较好的籽粒充实度。核心技术是每公顷栽秧 9.0 万穴、施氮 210 kg(表 2)。生产实践表明, 该方法不仅有显著的增产效果(表 3), 还具有明显的省种、省工、抗倒和抑制纹枯病发生等优点[44], 同时稻米整精米率大幅度提高, 垩白粒率明显下降[45]。

3.2　高产栽培规律

3.2.1　水稻旱育秧增产效果与当地产量水平和海拔高度关系

培育壮秧是水稻高产的基础, 水稻育秧方式主要分为旱地育秧和湿润育秧两大类。其中旱地育秧具有早播、早栽、早熟、高产、高效的特点[46−47], 其增产原理是秧苗素质好和营养生长期延长[48]。笔者研究结果表明, 旱育秧并非在任何地方都能增产,

表 2 杂交稻栽秧密度和施氮量对植株性状和产量的影响

Table 2 Effects of planting density and nitrogen application on the traits of plant and grain yield of hybrid rice

密度 Density (10^4 hill·hm^{-2})	施氮量 Nitrogen application rate (g·hm^{-2})	叶面积指数 Leaf area index	库容量 Sink (10^4grain·m^{-2})	粒叶比 Grain-leaf ratio (grain·cm^{-2})	有效穗 Productive panicle number (10^4·hm^{-2})	穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yeild (t·hm^{-2})
9.0	150	5.14	3.64	0.708 2	189.9	191.7	85.4	27.3	8.36^{g}
	210	6.15	4.10	0.666 7	214.8	190.9	91.9	28.8	10.54^{a}
	270	6.82	4.15	0.608 5	224.1	185.4	91.6	28.1	10.63^{a}
13.5	150	5.48	3.63	0.662 4	193.8	187.3	91.4	28.3	9.29^{ef}
	210	6.17	3.96	0.641 8	215.1	184.1	91.5	28.7	10.19^{ab}
	270	6.90	4.05	0.587 0	235.8	171.9	90.7	28.1	10.04^{bc}
18.0	150	5.87	3.53	0.609 8	206.3	173.8	91.3	28.4	8.98^{fg}
	210	6.23	3.92	0.629 2	237.6	165.3	89.2	28.6	9.60^{cde}
	270	6.86	3.98	0.580 2	238.2	167.3	89.7	28.4	9.70^{cde}
22.5	150	6.33	3.52	0.556 1	229.8	153.5	91.0	28.2	8.72^{fg}
	210	6.89	3.65	0.529 8	234.1	150.1	92.8	28.8	9.79^{bcd}
	270	7.08	3.70	0.522 6	249.0	148.6	92.7	28.2	9.64^{cde}
与密度的相关系数 Correlation coefficient with density		0.442 8	−0.553 7	−0.821 6**	0.606 0*	−0.947 4**	0.379 6	0.312 1	−0.301 2
与施氮量的相关系数 Correlation coefficient with nitrogen application rate		0.841 0**	0.723 4**	−0.447 9	0.729 6**	−0.223 4	0.300 2	0.155 6	0.714 3*

表 3 杂交稻超稀栽培示范的增产效果

Table 3 Yield increasing effect of super sparse cultivation of hybrid rice

年份 Year	杂交稻品种 Hybrid rice variety	栽培方式 Cultivation way	面积 Area (hm^2)			产量 Yield (t·hm^{-2})		
			高产田 Super high-yield field	核心区 Core area	示范区 Demonstration area	高产田 Super high-yield field	核心区 Core area	示范区 Demonstration area
2004	Ⅱ优 602 Ⅱ-you602	超稀栽培 Super sparse cultivation (SSC)	1.05	176.7	3 606.7	11.05	9.93	9.15
		传统栽培 Traditional cultivation (TC)	1.12	125.7	3 522.8	9.34	8.72	8.18
		SSC/TC (%)				18.31	13.88	11.86
2005	川香优 2 号 Chuanxiang-you 2	超稀栽培 Super sparse cultivation (SSC)	1.38	206.1	4 913.3	10.81	9.89	9.18
		传统栽培 Traditional cultivation (TC)	1.31	196.4	4 562.6	9.18	8.60	8.03
		SSC/TC (%)				17.76	15.0	14.32

其比当地湿润育秧的增产量与海拔高度呈极显著正相关，与当地湿润育秧的产量水平呈极显著负相关[48](表 4)，即在当地水育秧产量水平低于 6 750 kg·hm^{-2}和海拔 1 200 m 以上地区增产效果显著，海拔 350 m 以下而且在当地水育秧产量水平高于 9 750 kg·hm^{-2}地区的增产效果欠佳。其原因在于，水稻中低产田地区和较高海拔地区，多为肥力水平较低的稻田，水育秧的有效穗明显不够而低产，采用旱育秧后因其分蘖力较水育秧强，以致有效穗数大幅增加而增产幅度大；低海拔地区稻田肥力水平一般比高海拔地区高(可能与位置高的稻田肥料随降雨向下流入有关)，其水育秧条件下的产量水平相对较高，采用旱育秧后虽然其有效穗数仍有一定程度提高，但同时每穗粒实粒数有所降低，其增产程度相对较小；水育秧

表 4 杂交稻旱育秧较水育秧增产量(*Y*)与海拔高度(*X*$_1$)和水育秧产量(*X*$_2$)的关系

Table 4 Relationship between grain yield increase of upland seedlings over lowland seedlings (*Y*) and altitude (*X*$_1$) as well as grain yield of lowland seedlings (*X*$_2$) of hybrid rice

年份 Year	回归方程 Regression equation	*n*	*F*	t_1	t_2
1993	Y=123.21+0.043X_1−0.198X_2	55	32.64**	7.25**	3.68**
1994	Y=121.11+0.025X_1−0.173X_2	59	26.43**	3.33**	3.91**

产量水平较高地区，其群体穗粒结构趋于合理，在旱育秧情况下，其有效穗进一步增大甚至造成群体恶化，最终因穗粒矛盾而增产率不高或减产。

3.2.2 水稻高产高效氮肥施用量与地理位置和土壤肥力的关系

先期就水稻肥料高效利用途径进行了较多研

究。郑圣先等[49]根据湖南省 8 个双季稻种植区水稻高、中、低产水稻土养分状况，提出了相应的土壤肥力提升途径。张秀芝等[50]结合潜江地区当年水稻价格、肥料投入费用等计算出水稻的经济效益(Y)和施氮量(X)之间的函数式：$Y=-0.134X^2+37.097X+12\ 533-M$, $R^2=0.933\ 1$；由此得出经济效益最大时水稻的施氮量是 N 138 kg·hm^{-2}。与完全依据 SPAD 值指导关键生育期的氮肥施用量相近似(N 140 kg·hm^{-2})。杨梢娜等[51]探讨了杂交粳稻'浙优 12'最佳施氮量，与无氮肥区相比，在施 N 150 kg·hm^{-2} 基础上配施适量有机肥，其氮肥生理效率、氮肥回收率分别提高 33.1 g·g^{-1} 和 50.6%，水稻增产 61.2%。王伟妮等[52]研究显示，与不施肥对照相比，早、中、晚稻平衡施用氮、磷、钾肥增产率分别为 57.4%、44.0% 和 42.3%，肥料对早、中、晚稻产量的贡献率分别为 33.3%、28.6% 和 27.8%，平衡施肥是提高稻谷产量的关键技术。

由于各地区生态条件不同[53]和土壤肥力千差万别，严重制约了先期成果的应用效果与规模。作者[37]通过西南稻区 4 省(市)的 7 个生态点采用相同的试验方案，研究了试验点的地理位置、土壤养分、施氮量对水稻产量、穗粒结构及氮高效施用量的影响，不仅建立了根据地理位置和主要土壤养分含量确定水稻氮高效施用量的新方法(表 5)，而且可操作性强。主要优势表现：一是因为经度、纬度和海拔与气候条件关系密切[53]，利用目标稻田所处地理位置的经度、纬度和海拔取代气候条件，较好地解决了很多地区难以获得气候资料的问题，而且可精确到具体的每一块目标稻田，取得经度、纬度和海拔数据方便快速；二是只需选择部分土壤养分指标，有利于提高工作效率；三是因水稻品种而建立了相应的氮高效施用量预测模型，能较好地反映出品种对温光及肥料的反应特性，具有更强的生态适应性。

表 5　杂交稻氮素高效施用量(Y)与试验点的地理位置、土壤养分和施氮水平的回归分析(X)

Table 5　Regression analysis between optimal N fertilizer application of hybrid rice (Y) and geographic sites, soil nutrients for the tested sites and N application rate (X)

品种 Cultivar	回归方程 Regression equation	R^2	F 值 F value	偏相关系数 (r) Partial correlation coefficient	t 检验值 t value	显著水平 Significant level
Ⅱ优 7 号 Ⅱ-you 7	$Y=-392.979\ 1+10.013\ 2X_2+118.687\ 0+0.174\ 4X_{10}+2.062\ 4X_{11}$	0.999 5	910.57**	$r(Y, X_2)=0.999\ 6$	47.96**	<0.000 1
				$r(Y, X_8)=0.998\ 7$	27.55**	0.000 1
				$r(Y, X_{10})=0.975\ 4$	6.26**	0.008 2
				$r(Y, X_{11})=0.999\ 3$	37.76**	<0.000 1
渝香优 203 Yuxiang-you203	$Y=1\ 388.461\ 5-11.776\ 1X_1-0.154\ 8X_3+116.783\ 3X_6-39.769\ 7X_9+0.817\ 3X_{12}$	0.999 9	1 801.85**	$r(Y, X_1)=-0.999\ 3$	27.09**	0.001 4
				$r(Y, X_3)=-0.999\ 9$	76.40**	0.000 2
				$r(Y, X_6)=0.999\ 7$	43.50**	0.000 5
				$r(Y, X_9)=-0.998\ 9$	21.37**	0.002 2
				$r(Y, X_{12})=0.999\ 9$	58.54**	0.000 3

*, ** 表示相关性显著和极显著。X_1: 经度(°); X_2: 纬度; X_3(°): 海拔(m); X_6: 全氮(g·kg^{-1}); X_8: 全钾(g·kg^{-1}); X_9: pH; X_{10}: 有效氮(mg·kg^{-1}); X_{11}: 有效磷(mg·kg^{-1}); X_{12}: 有效钾(mg·kg^{-1})。* and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. X_1: longitude (°); X_2: latitude (°); X_3: altitude (m); X_6: total nitrogen (g·kg^{-1}); X_8: total potassium (g·kg^{-1}); X_9: pH; X_{10}: available nitrogen (mg·kg^{-1}); X_{11}: available phosphorus (mg·kg^{-1}); X_{12}: available potassium (mg·kg^{-1}).

3.2.3　水稻前氮后移增产作用与土壤地力产量的关系

彭少兵等[54]认为氮肥后移有利于提高水稻氮肥利用效率是基于水稻中后期大量的干物质积累量之需。在后移比例研究上，杨志远等[8]指出，强化栽培在施氮量为 150 kg·hm^{-2} 条件下，穗肥占总施氮量的 30%，在实现高产的同时，显著提高氮肥农学利用率和生理利用率。孙永健等[55]认为在高产施氮量 180 kg·hm^{-2} 条件下，淹水灌溉模式的氮肥后移量以占总施氮量的 40%~60%为宜，湿润灌溉(前期)+浅水灌溉(孕穗期)+干湿交替灌溉(抽穗至成熟期)模式的氮肥运筹方式为基肥：蘖肥：孕穗肥=3：3：4 组合最佳，旱种模式下应减少氮肥的后移量，氮肥后移量占总施氮量的 20%~40%为宜。杜晓东等[56]研究显示，以基肥、蘖肥、穗肥、粒肥配比=5：3：1：1 较好。霍中洋等[57]主张水稻前、中期施氮比例以 5：5 为佳。也有研究认为氮后移并非都有增产效果。李武等[58]研究结果指出，穗肥增氮对'培杂泰丰'具有一定增穗稳粒的增产效应，却没有增加'华优 86'的产量。徐富贤等[59]的研究表明，采用"底：蘖＝7：3"处理水稻产量最高，氮后移 20%~30%没有显著的增产效果。仇少君等[60]的研究表明，氮后移处理与农民习惯施肥相比，对水稻生物量、稻谷产量、

氮利用效率以及产量各构成因素均没有显著影响。

以上研究均在一个试验地点下获得的结论，其差异是否与供试土壤肥力水平不同有关，尚不明确。为此，作者[10]连续 2 年在西南区 7 个生态点进行了进一步的研究，发现氮肥施用量与氮后移比例对稻谷产量的影响在试验点间表现各异，取决于试验地点的土壤肥力，当稻田基础肥力较高(空白区产量超过 7 000 kg·hm^{-2})时氮后移的增产效果不佳，氮后移增产的处理表现为施氮量不高、氮后移比例小，并在保持一定有效穗数基础上，通过提高穗粒数和千粒重而增产。由此说明，稻田基础肥力差异是影响前氮后移增产效果的重要原因之一，中低肥力田或保水保肥能力差的稻田适宜前氮后移，高肥力田即使前期减少了一定的氮肥用量，但到中期仍能维持较高的肥力水平，因不缺肥再补施氮不仅不会增产，还造成肥料损失。因此，肥力较高和保水保肥能力强的稻田，在适当减少施氮总量条件下降低前氮后移的比例，通过测苗确定其后移量是非常必要的。

3.2.4 水稻粒肥高效施用量与剑叶 SPAD 值的关系

关于水稻穗粒肥对产量形成的效应，冯惟珠等[61]认为，穗肥对土壤供氮影响到抽穗至成熟期，不施穗肥的植株拔节到成熟期吸氮量下降，而不施粒肥仅影响抽穗至成熟期的吸氮量。增施粒肥量，有利于提高茎蘖成穗率，促进大穗形成而增产。陶诗顺等[62]指出，施粒肥有利于缓解大穗型杂交稻叶片衰减速度，并提高结实率而增产。杨连新等[27]研究结果表明，在已施用促花肥和保花肥条件下过多施用粒肥，会降低籽粒充实度而减产。以上从定性角度研究了穗粒肥对产量形成的影响，尚不能满足生产上的定量需求。为此，作者[63]提出了根据齐穗期剑叶 SPAD 值(X)与粒肥的高效施氮量(Y, kg·hm^{-2})的定量关系(Y=–30.798X+1 340.9, R^2=0.911 4)，预测粒肥高效施氮量的新方法。该方法不仅解决了水稻粒肥高效施用的定量问题，有效提高了氮肥施用效率，而且预测方法科学、简便。

综上分析，作者认为氮后移是否增产与施肥时的土壤供氮能力及植株的营养水平有关，当土壤供氮能力及植株的营养能满足后期正常生长，后移的部分氮肥则没有增产效果，测苗是确定适宜后移施氮量的重要方法之一。

3.2.5 水分管理对稻谷产量的影响

在保持高产适宜叶面积指数条件下，通过扩大库容量提高粒叶比，有利于提高光合效率而增产[39]。据此理论，凌启鸿等[40]、蒋彭炎等[41]提出在早发基础上，当全田总苗数达到高产计划穗数的 80%左右时开始灌深水或搁田控制后期无效分蘖，其成穗率可提高到 90%~95%，促进大穗的形成，较好地协调了穗数与穗大的矛盾进而增加库容达到增产的目标[42]。但是，这一方法在四川盆地东南部冬水田区却难以应用，该区水利灌溉条件差，深灌无水源保证；即使进行了深水控苗，由于技术上要求水深以不浸没主茎最上位全展叶的叶枕为度，以后随着苗体长高，逐渐加深水层，一直保持到 50%主茎倒二叶露尖，深水时间长达 10~15 d。此期稻田正值高温高湿生态环境下，极易诱发水稻纹枯病大发生导致减产。如采用搁田控苗的方法，技术上要求搁到土壤相对含水量为 40%~50%(田土硬实，脚踏有印而不陷)时，灌 1 次浅水，次日再排再搁，反复多次进行，直到 50%主茎倒二叶露尖。这也要求有足够水源作保证，而该区常常春夏旱频繁，灌溉条件又差，稻农不敢排水搁田。为此，作者近期发明了“一种冬水(闲)田水稻高产与蓄水相结合的水分管理技术”(专利申请中)，即移栽—分蘖盛期和孕穗期—成熟期保待田间最大水层在 6 cm 以内，分蘖盛期—孕穗期保持田间最大水层在 20 cm 以内；收获—翌年栽秧保持田间最大水层在 35 cm 以内。与传统水分管理技术相比，能显著提高不同穗型水稻产量水平的同时，还可大量利用自然降水，显著增强稻田抗旱能力。

3.3 因种调控技术

3.3.1 水稻本田高产适宜插秧密度与品种间穗粒数关系

先期因种栽培的研究较多[6-10]，而开展品种间高产共性技术的研究极少。笔者利用本研究团队 1978—1996 年分别以 25 个早、中籼水稻品种为材料，开展的高产栽培技术研究结果，分析了 25 个品种高产处理的技术差异性[64]：栽插密度和高产最适宜有效穗数在品种间差异极显著；高产栽插穴数(Y: 10^4·hm^{-2})分别与品种的穗粒数(X_1)和施氮量(X_2: kg·hm^{-2})呈极显著负相关关系，Y=61.545–0.174 9X_1–0.066 81X_2, F=160.76**, N=19，其他栽培技术在品种间的差异均不显著。因此，在大面积生产中，除有特殊要求的品种外，只需知道品种群体穗粒数和本田施氮量就可确定其本田高产栽培密度，播种期、播种量、移栽叶龄、每穴栽秧量按当地大面积传统技术实施即可，无需再针对不同品种开展因种高产栽培技术研究。

3.3.2　适应强化栽培品种的库源特征

2000 年以来，水稻强化栽培技术体系在我国南方稻区进行了广泛研究与示范，但对其增产效果有较大分歧。徐富贤等[44]结果表明，中上等肥力冬水田在以“3.5 叶期移栽、每公顷施氮 195 kg”为核心的强化栽培条件下，本田移栽密度过稀(4.83 万穴·hm^{-2})和过密(18.91~21.64 万穴·hm^{-2})均比现行高产栽培法(4.5 叶移栽、22.87 万穴·hm^{-2}、每公顷纯氮 150 kg)极显著减产，但当密度稀到每公顷栽 7.51~14.80 万穴时，则能够达到或超过现行高产栽培技术的产量水平。钟海明等[65]指出，杂交水稻强化栽培具有明显的增产效应和经济效益，栽插密度不宜小于 7.5 万穴·hm^{-2}。许凤英等[66]认为，与常规栽培相比，强化栽培可以延缓后期根系及叶片衰老，提高结实率及千粒重，进而提高产量。马均等[67]选用 12 个不同类型的杂交稻组合在四川绵阳、温江进行了强化栽培试验，结果表明，两个试点各组合产量以 7.5 万穴·hm^{-2} 密度处理较高，增产原因主要是有效穗的大幅度增加。但国际水稻研究所等单位则认为，水稻强化栽培原始技术在大面积生产中会明显减产，必须进行本土化改良(2003 年 4 月在海南三亚召开的全国作物栽培学术会议上的报告)。

强化栽培是以稀植、小苗为技术核心，其增产效果不同试验点间差异大可能与供试品种不同有关。就水稻强化栽培的品种适应性而言，马均等[67]认为强化栽培条件下，水稻的分蘖潜力能得到充分发挥，单株分蘖数可达 70~80 个(4.5 万穴·hm^{-2} 密度下)；强化栽培以选择穗型中等偏大、分蘖力中等偏上的组合为宜。钟海明等[65]指出，杂交水稻强化栽培在栽插密度 7.5 万穴·hm^{-2} 以上，以选择分蘖力中等偏上、株型稍松散的组合为宜。作者以 18 个杂交中稻组合为材料的试验结果表明，强化栽培和传统栽培的稻谷产量差异与组合的每穗粒数呈极显著负相关；传统高产栽培条件下穗粒数≤170 粒的杂交水稻组合，其强化栽培均比传统高产栽培显著增产，穗粒数超过 170 粒的品种则表现为平产或减产[68]。究其原因，穗粒数较低的品种在强化栽培条件下，虽然有效穗数比传统高产栽培有所下降，但穗粒数大幅度提高，总颖花量增加，结实率和千粒重变化不大，最终比传统栽培增产；与此相反，大穗型组合在强化栽培条件下，因分蘖力较弱，有效穗较传统栽培明显下降，结实率也因库源矛盾加剧而大幅度下降，尽管穗粒数增加较多也难以弥补有效穗数和结实率下降的损失而减产。

作者认为根据我国水稻生产、生态特点，必须因地制宜对水稻强化栽培原始技术进行创新才有较好的增产增收效果。综合先期研究结果，强化栽培的关键技术：品种分蘖力强、中小苗移栽，传统高产栽培条件下穗粒数≤170 粒的杂交水稻组合，每公顷栽插密度以 7.5~15 万穴为宜，最高不超过 18 万穴。

3.3.3　适应不同栽培模式品种的库源特征

许多学者以多点个品种或组合为材料，分别研究了各地区高产品种的植株形态特征。杜永等[69]提出了黄淮地区不同粳稻品种高产株型特征。曾勇军等[70]对长江中下游双季稻高产株型特征进行了初步研究。杨建昌等[71]通过中籼水稻品种产量与株型演进特征研究，指出了水稻高产育种的发展趋势。周开达等[72]认为亚种间杂交育种是获得超高产水稻品种的重要途径之一，并提出了其育种路线与品种特征。对指导各地高产育种具有重要作用。

水稻高产是品种、生态与栽培技术互作的结果。因此，适应不同地区不同栽培模式的品种类型应有较大差异。徐富贤等[64]分析了 25 个早、中籼良种的高产栽培技术与品种植株形态特征的关系，认为株型松散程度与高产适宜栽培密度呈显著负相关关系。冬水田适宜采用穗数型品种，小苗稀植足肥的栽培方法[44]。作者进一步指出，在 3 种栽培模式下，杂交中稻 20 个品种的平均产量表现为高密低肥>中密中肥>低密高肥，分别筛选出了适宜 3 种栽培模式和同时适宜 3 种栽培模式的杂交品种，可把杂交水稻品种的结实率作为选择适应不同栽培模式的科学依据[73]。

综合以上结果，作者认为不同生态区水稻高产对品种的库源特征要求总体有较大差异，就同一生态区而言，对不同栽培模式或技术也有其适应的品种类型。因此，在大面积生产实践中，应针对不同生态特点选择适宜的栽培模式和品种类型，方可提高新品种和新技术的推广效率。

3.3.4　适应氮肥后移品种的库源特征

先期众多研究对前氮后移的增产效果表现不尽相同[8,55−56,58−59]，是否与各研究者的供试品种不同有关，尚不清楚。为此，作者以 20 个杂交中稻组合为材料，研究了“前氮后移(底肥∶促花肥∶保花肥=6∶2∶2)”与“重底早追(底∶蘖=7∶3)”两种施氮方式与杂交组合间的产量及库源结构的互作效应。结果表明，20 个杂交组合在两种施氮方式间的产量及其穗粒结构表现不尽一致，前氮后移比重底早追法的增产量(Y)与杂交组合穗粒数(X)的关系可表述为:

Y=2 607.9−11.02X (R^2=0.630 8)[74]。据此推算，穗粒数≤237 粒的杂交组合适宜采用前氮后移施肥法，而穗粒数高于 237 粒的品种则表现为前氮后移比重底早追减产。分析其因，穗粒数较少的组合因分蘖力强，在前氮后移情况下，前期施氮量减少致群体苗峰下降、成穗率提高，仍能保持较高的有效穗数，加之氮后移其穗粒数和结实率有所提高，最后表现出前氮后移比重底早追显著增产；反之，穗粒数过大的品种分蘖力较弱，前氮后移致群体苗峰大幅下降，有效穗数下降较大而减产。

综上所述，前氮后移的增产效果即与品种类型有关，同时还受土壤肥力水平的影响。总体而言，在中上肥力水平下选用分蘖力强的品种，采用前氮后移有较好的增产效果；穗粒数过大的品种在适当提高施氮总量前提下，前氮后移的比例不宜过大，以20%~30%为宜。

3.3.5　机插秧的高产栽培技术

近年我国南方稻区水稻机插秧技术研究进展较快[75]。张洪程等[76]研究提出了机插稻“标秧、精插、稳发、早搁、优中、强后”高产栽培精确定量关键技术。苏柏元等[77]研究形成了超级稻‘甬优 12’机插单产 15 000 kg·hm^{-2} 的产量结构为穗数 219 万·hm^{-2}、穗粒数 329 粒、结实率 86%、千粒重 25.5 g；配套栽培技术是培育壮秧、适期早播早栽、合理稀植、控制高峰苗、好气灌溉、促进根系生长、培肥地力、定量施肥。作者以生产上推广的多个杂交中稻组合为材料，研究了冬水田机插秧适宜的品种特性与高产栽培技术[78]。结果表明，机插秧因籽粒灌浆期比手插秧延长，全生育期机插比手插平均长 1.9 d。机插秧平均最高苗、有效穗、结实率分别比手插秧高，但穗粒数和千粒重分别比手插秧低，平均比手插秧增产 184.5 kg·hm^{-2}，增产 2.54%。品种的最高苗数与机插秧增产程度呈显著负相关，机插秧以选择分蘖力中上等品种为宜。高产栽培技术：播种量 80 g·盘$^{-1}$，施氮 90~135 kg·hm^{-2}，按传统的重底早追的施氮方式，4.5 叶期按 29.7 cm × 19.8 cm 寸规格移栽。

育秧质量对机插稻产量影响较大，利用稻草为主要原料研发新型环保的机插稻秧盘替代传统的塑料秧盘，实现稻草有效还田和水稻可持续发展，是机插秧技术的发展方向[79]。陈惠哲等[80]设计研发了新型环保稻草机插秧盘，并对所育秧苗的素质、产量及机插后秧盘降解速度进行了比较研究。结果表明，稻草秧盘培育的秧苗生长健壮，根系能透过秧盘底部，且成毯性较好，搬运过程中不断裂，产量与传统塑料秧盘相比差异不显著，可代替塑料秧盘育秧机插。

4　杂交水稻高产高效理论与技术的研究展望

综上所述，我国对杂交水稻高产品种的库源结构及其因种高产栽培调控技术方面取得了重大进展。应用现有研究成果只要告知某一杂交水稻品种的生育期、关键库源特征和拟种植区的地理位置、土壤肥力水平，基本可制定其在该区的高产栽培技术规程，包括育秧方式、栽秧密度、栽培模式、氮肥运筹等。但是，由于大面积生产稻田土壤种类、肥力水平千差万别以及不同年度间气候条件差异等原因，很难制定出精准高效的栽培技术，尚需进一步开展以下研究予以补充和完善。

4.1　适应机插、机收的杂交水稻品种库源结构研究

随着我国国民经济结构重大调整和农村劳动力的日益短缺，水稻生产规模化与机械化进程呈加速度的发展趋势。水稻生产机械化主要包括机插秧、机械收获与机械烘干，其中对我国水稻种植机械化高产农艺研究成效显著[75]，但对适宜机插秧和机收品种的库源特征方面的文献不多。笔者以 10 个杂交中稻组合为材料的机插秧与手插秧同田对比试验结果表明，与手插秧相比，10 个品种平均增产 2.54%，其中增产品种 6 个，减产品种 4 个，品种最高苗数与机插增产程度呈显著负相关。表明并非任何品种都适宜机插。此外，机收的田间落粒损失大，植株成熟期姿态、冠层叶片状态、土壤硬实度对收获效率影响较大[81]。因此，急需加强适应机插、机收品种的库源特征及不同稻田类型机收排水时间与机型选择等方面的研究。

4.2　杂交水稻前期苗情诊断与高产高效施肥技术研究

尽管我国在水稻高产高效方面已深入系统的研究了较多技术模式，如水稻精确定量栽培理论与技术[82]、水稻强化栽培技术[83]、超级稻“三定”栽培理论与技术[84]。这些技术在科技人员的指导下确实能获得较高的产量与效益。但在大面积生产中，因技术到位率不够，往往因栽插密度不够或施肥量不够而难以达到预期的产量水平。先期十分重视中后期补施穗肥或粒肥对形成大穗和提高结实率方面的研究，对产量有一定补偿作用，但不能显著提高因栽插密度不够的产量水平[8,10,61]。对此类稻田应通过早期苗情诊断，尽早通过施氮肥促蘖提高有效穗而高产，目前这方面的研究极少。郭晓艺等[85]研究认为，杂交水稻栽后 12 d 分别取主茎和分蘖茎中的任一叶位，在最高苗期主茎和分蘖茎的顶 1 叶和顶 3 叶较

敏感，可作为测定 SPAD 值以诊断前期稻田供肥能力的时机与叶位。同时还应结合当时稻田的苗数，深入研究与水稻高产高效施肥量的关系，以达到早期诊断早补肥以达高产之目标。

4.3　杂交水稻倒伏的早期监测与预防技术研究

水稻高产伴随倒伏的发生，水稻倒伏的原因为品种抗倒性差、栽插密度过大、前期施肥过多和后期大风大雨等。先期关于水稻倒伏的研究颇多，但主要集中在倒伏发生时植株的形态特征及栽培方式与倒伏的关系和倒伏发生后的减损措施方面，而就如何进行倒伏的早期监测与预防技术的研究极少[86]。因此，应强化不同栽培模式(手插、机插、直播、抛栽等)下水稻生长前期(栽后 30~50 d)植株氮素含量、苗情发展动态及苗数等与后期(齐穗至成熟)倒伏程度以及前期不同农艺措施和植物生长调控剂的使用与缓解后期倒伏关系的研究，以达到既高产又抗倒的目的。

4.4　杂交水稻减氮增产高效技术研究

近些年来，我国水稻超级稻育种与超高产栽培取得突破性进展，各地高产典型层出不穷，对保障国家粮食安全起到了重要作用。然而这些超高产示范区的重要支撑技术无不是建立在高施肥量特别是高氮肥基础之上，很多地方出现高产不增收、肥料利用率低的生产问题，并因过剩肥水流失，致江河水质富营养化日趋严重，不利于水稻乃至整个农业生产的可持续发展。为此，急需大力开展杂交水稻减氮增产高效技术研究，重点探索基于不同土壤肥力水平下减氮与水稻产量、施氮边际效益的多年定位研究，提出不同生态区水稻减氮、增产、高效、可持续的栽培技术体系。

参考文献 References

[1] 袁隆平．中国杂交水稻要覆盖全球种植面积一半[EB/OL]．农博网，(2014-05-13). http://news.aweb.com.cn/20140513/554551784.shtml
Yuan L P. The acreage of Chinese hybrid rice will share about half of the whole world[EB/OL]. Agricultural Read Extensively Web, (2014-05-13). http://news.aweb.com.cn/20140513/554551784.shtml

[2] 徐富贤，洪松．环境因素对稻米品质影响的研究进展[J]．西南农业学报，1994, 7(2): 101–105
Xu F X, Hong S. Review on effect of environmental factors on rice quality[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1994, 7(2): 101–105

[3] 中国农业科学院．中国稻作学[M]．北京：农业出版社，1986: 287–299
Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese Rice[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 287–299

[4] 杨守仁，张龙步，王进民．水稻理想株形育种的理论和方法初论[J]．中国农业科学，1984, 17(3): 6–13
Yang S R, Zhang L B, Wang J M. The theory and method of ideal plant morphology in rice breeding[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, 17(3): 6–13

[5] 周开达，汪旭东．亚种间重穗型杂交稻研究[M]．成都：四川科学技术出版社，1997: 17–22
Zhou K D, Wang X D. Research on the Subspecific Heavy Ear Hybrid Rice[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997: 17–22

[6] 程式华，曹立勇，陈深广，等．后期功能型超级杂交稻的概念及生物学意义[J]．中国水稻科学，2005, 19(3): 280–284
Cheng S H, Cao L Y, Chen S G, et al. Conception of late-stage vigor super hybrid rice and its biological significance[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(3): 280–284

[7] 孙永健，杨志远，孙园园，等．成都平原两熟区水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交稻冈优 725 产量及品质的影响[J]．植物营养与肥料学报，2014, 20(1): 17–28
Sun Y J, Yang Z Y, Sun Y Y, et al. Effects of water-nitrogen management patterns and phosphorus and potassium fertilizer combined application on grain yield and quality of hybrid rice Gangyou 725 in rapeseed (wheat)-rice planting area of Chengdu plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 17–28

[8] 杨志远，胡蓉，孙永健，等．三角形强化栽培模式下氮肥运筹对Ⅱ优 498 产量及氮肥利用的影响[J]．作物学报，2012, 38(6): 1097–1106
Yang Z Y, Hu R, Sun Y J, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency of Eryou 498 in triangle-planted system of rice intensification[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(6): 1097–1106

[9] 徐富贤，何希德，熊洪，等．优质杂交中稻渝香优 203 产量的地域差异及其磷钾高效施用量的研究[J]．西南农业学报，2014, 27(5): 1984–1988
Xu F X, He X D, Xiong H, et al. Yield variation of different places and optimize application amount of phosphate and potassium of mid-season hybrid rice in southwest China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(5): 1984–1988

[10] 徐富贤，熊洪，张林，等．西南地区氮肥后移对杂交中稻产量及构成因素的影响[J]．植物营养与肥料学报，2014, 20(1): 29–36
Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. The effect of postponing nitrogen application on grain yield and the panicle-grain structure in mid-season hybrid rice in southwest China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 29–36

[11] 曹显祖，朱庆森．水稻品种的库源特征及其类型划分的研究[J]．作物学报，1987, 13(4): 265–272
Cao X Z, Zhu Q S. Study on characteristics of the relationship between source and sink in rice varieties and their classification[J]. Acta Agronomica Sinica, 1987, 13(4): 265–272

[12] 马均，黎汉云，李仕贵，等．重穗型杂交稻 D 优 527 的栽培生理特点及调控对策研究[J]．中国水稻科学，2002, 16(3): 231–235

Ma J, Li H Y, Li S G, et al. Cultural and physiological characteristics and its cultivation practice of the heavy panicle type hybrid rice Dyou 527[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2002, 16(3): 231–235
[13] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 等. 亚种间杂交稻产量源库特征[J]. 中国农业科学, 1997, 30(3): 52–59
Zhu Q S, Zhang Z J, Yang J C, et al. Source-sink characteristics related to the yield in inter-subspecific hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30(3): 52–59
[14] 周开达, 马玉清, 刘太清. 穗重型杂交稻育种[J]. 四川农业大学学报, 1995, 13(4): 403–407
Zhou K D, Ma Y Q, Liu T Q. The breeding of subspecific heavy ear hybrid rice[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1995, 13(4): 403–407
[15] 袁隆平. 杂交水稻超高产育种[J]. 杂交水稻, 1997, 12(6): 1–6
Yuan L P. Hybrid rice breeding for super high yield[J]. Hybrid Rice, 1997, 12(6): 1–6
[16] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 杂交中稻源库比对籽粒充实的影响及其高产组合的源库特征[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 265–271
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, et al. Effect of source-sink ratio on grain filling and the source-sink characteristics of high yield varieties of mid-season hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 265–271
[17] 徐富贤, 阎运德, 熊洪, 等. 冬水田区杂交中稻高产组合的库源特征研究[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(2): 144–152
Xu F X, Yan Y D, Xiong H, et al. Studies on the sink-source characteristics of mid-season hybrid rice for high yield in winter water logged field[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(2): 144–152
[18] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 等. 杂交中稻高产品种灌浆期的库源特征[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(2): 120–122
Xu F X, Zheng J K, Zhu Y C, et al. Sink-source characteristics of high-yielding combinations of hybrid mid-season rice[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23(2): 120–122
[19] 万安良, 钟永模. 水稻品种叶面积与穗重关系的研究[J]. 中国农业科学, 1981(6): 21–28
Wan A L, Zhong Y M. Studies on the relationship between the flag leaf area and the panicle weight in rice cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1981(6): 21–28
[20] 徐富贤, 洪松. 杂交中稻各叶位叶片对头季稻及再生稻产量形成作用的研究[J]. 作物研究, 1993, 7(2): 22–26
Xu F X, Hong S. Effects of leaves at different node-position on yield formation of main crop and rationing rice[J]. Crop Research, 1993, 7(2): 22–26
[21] 杨建昌, 朱庆森, 曹显祖. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究[J]. 中国农业科学, 1992, 25(4): 7–14
Yang J C, Zhu Q S, Cao X Z. Effects of the structure and photosynthetic characters of the canopy on the yield formation in rice plants[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1992, 25(4): 7–14
[22] 凌启鸿, 龚荐, 朱庆森. 中稻各叶位叶片对产量形成作用的研究[J]. 江苏农学院学报, 1982, 3(2): 9–19
Ling Q H, Gong J, Zhu Q S. Effects of leaves at different node-position on yield formation[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1982, 3(2): 9–19
[23] 朱永川, 熊洪, 张林, 等. 杂交中稻齐穗期下部叶片对结实率的影响与组合间库源结构的关系[J]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1225–1231
Zhu Y C, Xiong H, Zhang L, et al. Effect of leaves below 4th leaf from top at full heading on seed set percentage in association with source-sink ratio in mid-season hybrid rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(5): 1225–1231
[24] Yoshida S. Fundamentals of Rice Crop Science[M]. Los Banos: IRRI, 1981: 216–238
[25] 王余龙, 姚友礼, 李昙云, 等. 水稻籽粒有关性状与粒重关系的初步探讨[J]. 作物学报, 1995, 21(5): 573–578
Wang Y L, Yao Y L, Li T Y, et al. An inquiring into grain characters and their relations with grain weight in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(5): 573–578
[26] 王余龙, 山本由德, 姚友礼, 等. 栽培条件对水稻粒重的影响及其原因分析[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 280–290
Wang Y L, Yoshinori Y, Yao Y L, et al. Effect of cultural conditions on grain weight and it's causes in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(3): 280–290
[27] 杨连新, 王余龙, 黄建晔, 等. 施氮时期对稻穗不同部位籽粒谷壳生长与发育的影响[J]. 江苏农业研究, 2001, 22(3): 7–12
Yang L X, Wang Y L, Huang J Y, et al. Effects of N application date on hull growth and its development on different positions of the panicle[J]. Jiangsu Agricultural Research, 2001, 22(3): 7–12
[28] 徐富贤, 张乃周, 熊洪, 等. 杂交中稻组合间的粒重稳定性与其库源结构的关系[J]. 杂交水稻, 2009, 24(4): 59–64
Xu F X, Zhang N Z, Xiong H, et al. Relationship between grain weight variation and sink-source characters of mid-season hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2009, 24(4): 59–64
[29] 徐富贤, 郭晓艺, 张林, 等. 杂交中稻库源结构对弱势粒灌浆结实的影响[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(1): 96–101
Xu F X, Guo X Y, Zhang L, et al. Effects of sink-source structures on filling of superior and inferior spikelets of mid-season hybrid rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(1): 96–101
[30] Kawata S I, Soejima M. On superficial root formation in rice plant[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1974, 43(3): 354–374
[31] Tatsumi J, Kono Y. Effects of shading on respiration and ammonium uptake of rice roots-comparison of activity in root from different nodes[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1980, 49(1): 66–74
[32] 凌启鸿, 凌励. 水稻不同层次根系的功能及对产量形成作用的研究[J]. 中国农业科学, 1984, 17(5): 3–11
Ling Q H, Ling L. Studies on the functions of roots at different nodepositions and their relation to the yield formation in rice plants[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, 17(5): 3–11

[33] 徐富贤, 郑家奎, 蒋开锋, 等. 杂交中稻发根力及根系活力与地上部性状的关系[J]. 西南农业学报, 2002, 15(2): 34–37
Xu F X, Zheng J K, Jiang K F, et al. Relationships between root growth ability and root flux activity and aerial part characteristics of hybrid mid-season rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(2): 34–37
[34] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 等. 杂交中稻根系及地上部性状对结实率的通径分析[J]. 种子, 2003(2): 5–6
Xu F X, Zheng J K, Zhu Y C, et al. Path analysis between characters of root and over ground and grain set rate of hybrid mid-season rice[J]. Seed, 2003(2): 5–6
[35] 邹应斌. 水稻超高产栽培的理论与技术策略—兼论壮秆重穗栽培法[J]. 农业现代化研究, 1997, 18(1): 31–35
Zou Y B. Theory and technique of supper high yielding of rice — the cultural method of strong individual plants and weighty panicles[J]. Research of Agricultural Modernization, 1997, 18(1): 31–35
[36] 郑家国, 张洪松, 熊洪. 西南杂交稻目标产量生产技术规范[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2008: 1–37
Zheng J G, Zhang H S, Xiong H. Production Technology Standard of Target Yield for Hybrid Rice in South-west District of China[M]. Chengdu: Sichuan Agricultural Science and Technology Publishers, 2008: 1–37
[37] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 西南稻区杂交中稻产量的地域差异及其高效施氮量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 273–282
Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Regional yield variations and optimized application amounts of nitrogen of mid-season hybrid rice in Southwest China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(2): 273–282
[38] 田中孝幸. 水稻的基础生理和生态[M]. 朱庆森, 沈德余, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 1–24
Tian Z X X. The Basic Physiology and Ecology of Rice[M]. Zhu Q S, Shen D Y, Trans. Shanghai: Shanghai Sciences and Technology Press, 1987: 1–24
[39] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨[J]. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1–11
Ling Q H, Zhang H C, Cai J Z, et al. Investigation on the population quality of high yield and its optimizing control programme in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, 26(6): 1–11
[40] 凌启鸿, 苏祖芳, 张海泉. 水稻成穗率与群体质量的关系及其影响因素的研究[J]. 作物学报, 1995, 21(4): 463–469
Ling Q H, Su Z F, Zhang H Q. Relationship between earbearing tiller percentage and population quality and its influential factors in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(4): 463–469
[41] 蒋彭炎, 洪晓富, 冯来定, 等. 水稻中期群体成穗率与后期群体光合效率的关系[J]. 中国农业科学, 1994, 27(6): 8–14
Jiang P Y, Hong X F, Feng L D, et al. Relation between percentage of ear-bearing of colony in the middle phase and photosynthesis efficiency in the late in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(6): 8–14
[42] 蒋彭炎, 冯来定, 史济林, 等. 水稻三高一稳栽培法的理论与技术[J]. 山东农业大学学报, 1992, 23(S): 18–24
Jiang P Y, Feng L D, Shi J L, et al. The theory and technology of three high and one stable technique in rice culture[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1992, 23(S): 18–24
[43] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 川东南冬水田杂交中稻进一步高产的栽培策略[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 1004–1009
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, et al. Cultivation strategy of hybrid mid-season rice for further high yield in winter water-logged field in the southeast of Sichuan Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(6): 1004–1009
[44] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 等. 冬水田杂交中稻小苗超稀栽培对水稻生长的影响[J]. 杂交水稻, 2003, 18(3): 40–43
Xu F X, Zheng J K, Zhu Y C, et al. Effects of the cultivation by super sparse transplanting of small seedlings on the growth of medium hybrid rice in winter waterlogged fields[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(3): 40–43
[45] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 等. 川东南杂交中稻超稀栽培对稻米整精米率和垩白粒率的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 686–691
Xu F X, Zheng J K, Zhu Y C, et al. Effect of super sparse cultivation on head milled rice percentage and chalkiness in hybrid rice varieties in the eastern and southern districts of Sichuan Province[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(5): 686–691
[46] 郑家国, 谭中和. 四川水稻旱育秧栽培技术研究[J]. 西南农业学报, 1994, 7(4): 13–19
Zheng J G, Tan Z H. Studies on the cultural techniques of drily raised rice seedlings in Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1994, 7(4): 13–19
[47] 洪松, 徐富贤. 杂交中稻蓄留再生稻的旱育中苗技术研究[J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(S): 45–51
Hong S, Xu F X. Studies on the cultural techniques of mid-seedlings for upland rice seedling in mid-hybrid-ratooning rice[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1994, 17(S): 45–51
[48] 徐富贤, 洪松. 水稻旱育秧的增产原理与应用效果评价[J]. 西南农业学报, 1996, 9(4): 12–16
Xu F X, Hong S. Rationale for grain yield increase from upland rice seedling and grain yield increase effects in different ecological zones of Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1996, 9(4): 12–16
[49] 郑圣先, 廖育林, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土肥力特征的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1108–1121
Zheng S X, Liao Y L, Yang Z P, et al. Studies on fertility characteristics of different productive paddy soils in double-rice copping regions of Hunan Province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1108–1121
[50] 张秀芝, 易琼, 朱平, 等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 782–788
Zhang X Z, Yi Q, Zhu P, et al. Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 782–788
[51] 杨梢娜, 俞巧钢, 叶静, 等. 施氮水平对杂交晚粳“浙优 12”产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2010, 16(5): 1120–1125
Yang S N, Yu Q G, Ye J, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1120–1125

[52] 王伟妮, 鲁剑巍, 陈防, 等. 湖北省水稻施肥效果及肥料利用效率现状研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 289–295
Wang W N, Lu J W, Chen F, et al. Study on fertilization effect and fertilizer use efficiency of rice in Hubei Province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 289–295

[53] 徐富贤, 熊洪. 水稻地膜育秧膜内外气温关系及其应用[J]. 四川农业大学学报, 1998, 16(2): 242–245
Xu F X, Xiong H. Relation between temperatures in film and out film for lowland seedling and upland seedling in thiner film of rice and it's applying[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1998, 16(2): 242–245

[54] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103

[55] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2221–2232
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, et al. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(12): 2221–2232

[56] 杜晓东, 赵宏伟, 王敬国, 等. 氮肥运筹对寒地粳稻淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 159–167
Du X D, Zhao H W, Wang J G, et al. Changes in starch accumulation and activity of enzymes associated with starch synthesis under different nitrogen applications in Japonica rice in cold region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 159–167

[57] 霍中洋, 张洪程, 吴桂成, 等. 超级粳稻单产 800kg/667m^2 氮素吸收特点及施氮模式的构建[J]. 中国稻米, 2012, 18(6): 10–13
Huo Z Y, Zhang H C, Wu G C, et al. Characteristics of nitrogen uptake and construction of nitrogen application pattern of Japonica rice yielding 800 kg/667 m^2 grains[J]. China Rice, 2012, 18(6): 10–13

[58] 李武, 唐湘如. 穗肥增氮对超级稻产量、品质及源库特性的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(3): 9–11
Li W, Tang X R. Effects of increasing panicle N-fertilizer on yield, quality and source-sink characteristics of super rice[J]. China Rice, 2010, 16(3): 9–11

[59] 徐富贤, 张林, 熊洪, 等. 冬水田杂交中稻川香优 9838 的高产栽培技术与植株性状研究[J]. 中国稻米, 2009, 15(6): 32–35
Xu F X, Zhang L, Xiong H, et al. High-yielding cultivation technology and plant characters for a mid-season hybrid rice combination Chuanxiangyou 9838[J]. China Rice, 2009, 15(6): 32–35

[60] 仇少君, 赵士诚, 苗建国, 等. 氮素运筹对两个晚稻品种产量及其主要构成因素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1326–1335
Qiu S J, Zhao S C, Miao J G, et al. Effect of different N management practices on yield and its main formed factors in two later season rice genotypes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1326–1335

[61] 冯惟珠, 徐茂, 季春梅, 等. 施氮肥时期对土壤供氮、稻株吸氮及产量的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(3): 16–21
Feng W Z, Xu M, Ji C M, et al. Effect of nitrogen fertilizer regime on soil nutrient supplying, yield and its nitrogen uptaking of rice plant[J]. Jiangsu Agricultural Research, 2000, 21(3): 16–21

[62] 陶诗顺, 向珣朝, 张清东. 重穗型杂交稻抛秧栽培施氮技术探讨[J]. 西南农业学报, 2002, 15(3): 39–42
Tao S S, Xiang X C, Zhang Q D. Studies on application methods of N fertilizer in scattered-transplanting cultivation of large panicle hybrid rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(3): 39–42

[63] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 杂交中稻粒肥高效施用量与齐穗期 SPAD 值关系研究[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 449–454
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, et al. Relationship between the efficient amount of nitrogen application for grain filling and the SPAD value at full panicle stage in mid-season hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(3): 449–454

[64] 徐富贤 熊洪. 川东南冬水田地区籼稻良种高产栽培规律研究[J]. 西南农业学报, 2000, 13(3): 12–17
Xu F X, Xiong H. A study on high yield cultivation regularity of *Indica* rice varieties in the winter paddy field regions in the southeast Sichuan[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2000, 13(3): 12–17

[65] 钟海明, 黄爱明, 刘建萍, 等. 杂交水稻强化栽培增产效果及经济效益分析[J]. 杂交水稻, 2003, 18(4): 45–46
Zhong H M, Huang A M, Liu J P, et al. Analysis on the yield-increasing effect and economic benefits of the system of rice intensification (SRI) in hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(4): 45–46

[66] 许凤英, 马均, 王贺正, 等. 强化栽培条件下水稻的根系特征及其与产量形成的关系[J]. 杂交水稻, 2003, 18(4): 61–65
Xu F Y, Ma J, Wang H Z, et al. The characteristics of roots and their relation to the formation of grain yield under the cultivation by system of rice intensification (SRI)[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(4): 61–65

[67] 马均, 陶诗顺, 田彦华, 等. 水稻强化栽培试验初报[J]. 杂交水稻, 2002, 17(5): 42–44
Ma J, Tao S S, Tian Y H, et al. A preliminary report of the experiment on the system of rice intensification[J]. Hybrid Rice, 2002, 17(5): 42–44

[68] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 冬水田杂交中稻组合类型对强化栽培的适应性[J]. 作物学报, 2005, 31(4): 493–497
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, et al. Adaptation of mid-season hybrid rice to the intensive cultivate system in winter water-logged field[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(4): 493–497

[69] 杜永, 王艳, 王学红, 等. 黄淮地区不同粳稻品种株型、产

量与品质的比较分析[J]. 作物学报, 2007, 33(7) 1079–1085
Du Y, Wang Y, Wang X H, et al. Comparisons of plant type, grain yield, and quality of different Japonica rice cultivars in Huanghe-Huaihe river area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(7): 1079–1085

[70] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 等. 长江中下游双季稻高产株型特征初步研究[J]. 作物学报, 2009, 35(3): 546–551
Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, et al. Preliminary study on the plant type characteristics of double cropping rice in middle and lower reaches of Changjiang River[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(3): 546–551

[71] 杨建昌, 王朋, 刘立军, 等. 中籼水稻品种产量与株型演进特征研究[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 949–955
Yang J C, Wang P, Liu L J, et al. Evolution characteristics of grain yield and plant type for mid-season Indica rice cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(7): 949–955

[72] 周开达, 汪旭东, 李仕贵, 等. 亚种间重穗型杂交稻研究[J]. 中国农业科学, 1997, 30(5): 91–93
Zhou K D, Wang X D, Li S G, et al. The study on heavy panicle type of inter-subspecific hybrid rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30(5): 91–93

[73] 徐富贤, 张林, 熊洪, 等. 杂交中稻组合对冬水田不同栽培模式的适应性研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(2): 541–548
Xu F X, Zhang L, Xiong H, et al. The study on the adaptation of mid-season hybrid rice to different cultivation models in winter water-logged field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(2): 541–548

[74] 徐富贤, 张林, 熊洪, 等. 冬水田杂交中稻品种适应氮肥后移的筛选指标[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1329–1337
Xu F X, Zhang L, Xiong H, et al. The criterion for the rice hybrids suitable for shifting partial nitrogen fertilizer from basal-tillering to panicle initiation in water-logged paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1329–1337

[75] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273–1289
Zhang H C, Gong J L. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1273–1289

[76] 张洪程, 李杰, 戴其根, 等. 机插稻“标秧、精插、稳发、早搁、优中、强后”高产栽培精确定量关键技术[J]. 中国稻米, 2010, 16(5): 1–6
Zhang H C, Li J, Dai Q G, et al. Key techniques of the model for precise quantitative high-yielding cultivation of machine-transplanting rice “standardizing seedlings, precisely transplanting, steadily growing, earlier drainage, optimizing middle-stage, strengthening later-stage”[J]. China Rice, 2010, 16(5): 1–6

[77] 苏柏元, 朱德峰. 超级稻甬优 12 机插单产 1000kg/667m^2 的产量结构与配套栽培技术[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 97–100
Su B Y, Zhu D F. Yield components and mechanical transplanting cultivation techniques of super rice Yongyou 12 for 1000 kg/667 m^2[J]. China Rice, 2013, 19(4): 97–100

[78] 徐富贤, 张林, 熊洪, 等. 冬水田杂交中稻机插秧的高产配套技术研究[J]. 中国稻米, 2016, 22(3): 52–56
Xu F X, Zhang L, Xiong H, et al. High yield cultivation techniques of medium season hybrid rice for machine transplanting in winter water-logged field[J]. China Rice, 2016, 22(3): 52–56

[79] Haytham M E, Hassaanein M K, Zahoor A, et al. Rice straw-seedbed for producing rice seedling mat[J]. International Journal of Sustainable Agriculture, 2010, 2(2): 26–33

[80] 陈惠哲, 朱德峰, 王广, 等. 稻草机插秧盘育秧对水稻秧苗生长及产量形成的影响[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 19–22
Chen H Z, Zhu D F, Wang G, et al. Effects of raising seedling in rice straw tray on growth and yield formation of mechanical transplanted rice[J]. China Rice, 2013, 19(4): 19–22

[81] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702–1717
Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(9): 1702–1717

[82] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻精确定量栽培理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 57–135
Ling Q H, Zhang H C, Ding Y F, et al. Theory and Technology of Rice Precise Quantitative[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 57–135

[83] 朱德峰. 水稻强化栽培技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006: 17–30
Zhu D F. Rice Intensive Cultivate System Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 17–30

[84] 邹应斌, 夏胜平. 超级稻“三定”栽培理论与技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2011: 121–127
Zhou Y B, Xia S P. Theory and Technology of “Three-Determination” Cultivation for Super Rice[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2011: 121–127

[85] 郭晓艺, 张林, 徐富贤, 等. 杂交中稻叶片 SPAD 值的田间测定方法研究[J]. 中国稻米, 2010, 16(5): 16–20
Guo X Y, Zhang L, Xu F X, et al. Study on field determination methods of SPAD in leaves in middle hybrid rice[J]. China Rice, 2010, 16(5): 16–20

[86] 雷小龙, 刘利, 苟文, 等. 种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1814–1825
Lei X L, Liu L, Gou W, et al. Effects of planting methods on culm lodging resistance of Indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(10): 1814–1825